

ЛИДАР КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК ИЗ РЕЗЕРВУАРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ ГОРНОГО ТРАНСПОРТА, РАБОТАЮЩЕГО НА ВОДОРОДЕ

В.Е. Привалов¹, В.А. Туркин², В.Г. Шеманин³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

² Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
Новороссийск, Россия, e-mail: turvla@mail.ru

³ Новороссийский политехнический институт (филиал)
Кубанского государственного технологического университета,
Новороссийск, Россия

Аннотация: В горнодобывающей промышленности используется оборудование, которое потребляет большое количество энергии. В шахтных работах дизельная техника находит широкое применение благодаря своей гибкости, грузоподъемности и адаптивности к различным условиям ее эксплуатации. Однако при использовании дизельного горно-шахтного оборудования наблюдается высокое потребление дизельного топлива и высокий уровень выбросов парниковых газов, главным образом монооксида углерода. Использование водорода в качестве топлива дает возможность не только обезуглеродить транспорт и энергетику горнодобывающей отрасли, но и значительно снизить местное загрязнение воздуха. Использование водорода как топлива в качестве привода двигателей электростанций и объектов транспорта горнодобывающей отрасли требует разработки оборудования для контроля утечки водорода из элементов хранения и подачи топлива к двигателям. Рассмотрено решение задачи контроля утечек водорода из топливных баков горнодобывающего транспорта и энергетического оборудования, обеспечивающего работу горнодобывающих предприятий, лидаром комбинационного рассеяния света (КРС). Представлены графические зависимости времени измерения концентрации водорода в функции расстояния до места утечки водорода. Расчетом лидарного уравнения установлено, что минимальное время измерения концентрации водорода в воздушной среде лидаром КРС будет на длине волны 532 нм.

Ключевые слова: горнодобывающая отрасль, экология, транспорт, двигатели электростанций, декарбонизация, топливо, водород, контроль утечек, лазер.

Для цитирования: Привалов В. Е., Туркин В. А., Шеманин В. Г. Лидар комбинационного рассеяния света для обнаружения утечек из резервуаров и двигателей горного транспорта, работающего на водороде // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 116–125. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_116.

Raman lidar for detection of leaks from tank and engines of hydrogen-fueled mining transportation

V.E. Privalov¹, V.A. Turkin², V.G. Shemanin³

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

² Admiral Ushakov Maritime State University,
Novorossiysk, Russia, e-mail: turvla@mail.ru

³ Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of Kuban State Technological University,
Novorossiysk, Russia

Abstract: The mining industry uses equipment that consumes large amounts of energy. In mining operations, diesel equipment is widely used due to its flexibility, load capacity and adaptability to various operating conditions. However, when using diesel mining equipment, there is a high consumption of diesel fuel and high levels of greenhouse gas emissions, mainly carbon monoxide. Using hydrogen as a fuel not only offers the opportunity to decarbonize transportation and the mining industry, but also significantly reduces local air pollution. The use of hydrogen as a fuel to drive engines of power plants and transport facilities in the mining industry requires the development of equipment to control the leakage of hydrogen from storage elements and fuel supply to the engines. The solution to the problem of monitoring hydrogen leaks from fuel tanks of mining vehicles and power equipment that ensures the operation of mining enterprises using Raman lidar (RSL) is considered. The graphical dependences of the time of measurement of hydrogen concentration as a function of the distance to the place of hydrogen leak are presented. By calculating the lidar equation, it was established that the minimum time for measuring the hydrogen concentration in the air with the Raman lidar will be at a wavelength of 532 nm.

Key words: mining, ecology, transport, power plant engines, decarbonization, fuel, hydrogen, leak control, laser.

For citation: Privalov V. E., Turkin V. A., Shemanin V. G. Raman lidar for detection of leaks from tank and engines of hydrogen-fueled mining transportation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):116-125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_116.

Введение

Горнодобывающая промышленность потребляет большое количество энергии в ходе своей основной деятельности, включая разведку, добычу, транспортировку и переработку. Расход топлива является основным источником транспортных расходов при открытых и подземных горных работах. По данным Международного совета по горнодобывающей промышленности и металлам (ICMM), затраты на топливо могут составлять до 32% от общего потребления энергии на шахтах. Это означает, что для

крупного горнодобывающего предприятия стоимость дизельного топлива может стать существенным фактором, влияющим на прибыльность компании [1].

Одной из проблем, связанной с работой двигателей, использующих ископаемое топливо, является выбросы газов, включая оксиды углерода, углеводороды, твердые частицы (сажа) и оксиды азота, которые напрямую влияют на окружающую среду [2–5].

Таким образом, интенсивное потребление дизельного топлива мотивирует поиск альтернатив возобновляемой энер-

гии, которые способствуют снижению воздействия на окружающую среду в результате использования топлива, полученного из нефти. Среди возможностей использования возобновляемой энергии — «Зеленый водород»: водород, произведенный с использованием возобновляемых источников энергии, таких как солнечная, ветровая или гидроэнергетика, который хранится в резервуарах, транспортируется по топливным трубопроводам, а затем используется в топливных элементах или двигателях внутреннего сгорания [6].

Водород считается лучшим «кандидатом» в качестве добавки в дизельное топливо, поскольку это возобновляемый источник, который соответствует требуемым характеристикам двигателей, например, погрузочно-доставочных машин с дизельным приводом (ПД-2Д, ПД-5А; ПД-2Г), улучшает производительность и снижает выбросы основного парникового газа — диоксида углерода CO_2 . Добавление водорода в топливо дизельных двигателей увеличивает их топливную эффективность, снижает выбросы не только CO_2 , но также оксидов азота (NOX) и твердых частиц (сажи). Кроме того, добавление водорода также улучшает характеристики двигателя за счет увеличения мощности и крутящего момента. Это вызвано более высокой скоростью распространения пламени водорода по сравнению с дизельным топливом [7].

Использование водорода в транспортных средствах более безопасно, чем бензин и дизельное топливо. Это объясняется тем, что водород в 14 раз легче воздуха и поэтому быстро рассеивается в случае утечки, снижая опасность воспламенения. Наиболее перспективным применением водорода является электрический транспорт с использованием топливных элементов. В этом случае эффективность использования водорода примерно в два-три раза выше, чем у

транспорта с двигателем внутреннего сгорания на обычном топливе. Кроме того, у транспорта с водородным топливом нулевые выбросы вредных веществ, так как единственным выбросом является водяной пар [8, 9].

Международное энергетическое агентство недавно объявило, что чистый водород в настоящее время переживает «беспрецедентный политический и деловой импульс». Во множестве стран, в том числе с крупнейшей экономикой, есть политика и проекты в области водородной энергетики. В 2017 г. группа ведущих мировых энергетических, транспортных и промышленных компаний создала рабочую группу, чтобы объединить политические и частные заинтересованные стороны с целью продвижения водорода как «ключевого элемента энергетического перехода» [10—11, 22].

Водород в настоящее время становится жизнеспособным средством обезуглероживания трудно поддающихся декарбонизации секторов, таких как автомобильный транспорт, в котором одной электрификации может быть недостаточно, чтобы достичь амбициозных целей в области климата, кульминацией которых станет нулевой выброс парниковых газов к середине века [12—14].

Первые опыты по применению водорода в энергетике относятся к началу XIX в. Некоторые исследователи данного вопроса считают, что первый водородный двигатель появился раньше бензинового. Интерес к водороду в XIX в. и позднее был обусловлен не только энергетикой, есть и другие способы его применения в промышленности, включая горнодобывающую отрасль.

В горнодобывающей отрасли применение водорода возможно для работы двигателей карьерных самосвалов БЕЛАЗ серии 75710.

Основным преимуществом альтернативных топлив является уменьшенное,

по сравнению с дизельным топливом, содержание токсичных компонентов в отработавших газах двигателей. Из возможных альтернативных топлив наиболее предпочтительным является водород [12, 13].

В настоящее время применяются следующие способы получения водорода: конверсия метана водяным паром; газификация углерода водяным паром; термическое разложение метана; электролиз воды [11].

Использовать топливную ячейку для производства чистого водорода предложил А. Meyer Stanley [14]. В указанном патенте приводится описание способа и устройства для получения энергии из смеси водорода и кислорода, в которой заряженные ионы стимулируются до активированного состояния, а затем проходят через резонансную полость, где достигаются последовательно возрастающие уровни энергии, и, наконец, передаются в выпускное отверстие для производства тепловой взрывной энергии.

Целью изобретения является получение значительного выхода энергии из атомов воды. Молекулы воды распадаются на водород и кислород. Электрически заряженные ионы газа противоположной электрической полярности активируются энергией электромагнитных волн и подвергаются воздействию высокотемпературной тепловой зоны. Процесс водородного разрыва начинается с молекулы воды, которая подвергается последовательно возрастающим электрическим, волновым энергиям и тепловым силам. В результате беспорядочно ориентированные молекулы воды выравниваются относительно полярной ориентации молекул и сами поляризуются и «удлиняются» за счет приложения электрического потенциала, в итоге ковалентная связь молекул воды настолько ослабляется, что атомы диссоциируют и молекула распадается на элементар-

ные компоненты водорода и кислорода. Процесс и устройство являются источником водорода, используемого как топливо в транспортных средствах (наземный, подземный, воздушный, водный транспорт), а также для выработки электроэнергии на стационарных и передвижных электростанциях).

На конференции «Лазерно-информационные технологии-2018» авторы статьи предложили для повышения эффективности топливной ячейки ввести в зону реакции лазерное излучение [15].

Методы лазерной диагностики утечек водорода

В воздушной среде горнодобывающих предприятий концентрация молекул водорода примерно равна $1,345 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что представляет большую проблему для замера их концентраций [16].

В настоящее время для измерения концентрации водорода в атмосфере используется газовая хроматография или спектрофотометрия [17]. Недостатком способов является низкое быстродействие, что усложняет их применение при открытом способе разработки залежей полезных ископаемых.

В основе методов лазерного мониторинга молекул водорода в атмосфере лежат следующие оптические явления: Рэлеевское рассеяние, комбинационное рассеяние света (КРС), рассеяние Ми и некоторые другие.

В предлагаемой системе мониторинга утечек водорода из резервуаров хранения и систем подачи топлива к двигателям горного транспорта, работающего на водороде, использовалась приведенная на рис. 1 схема лидара КРС, подробное описание принципа действия которого, а также перечень входящих в него элементов приведены в литературе [16, 18, 19].

Излучение лазера δ направлялось на молекулы водорода, а КРС этими моле-

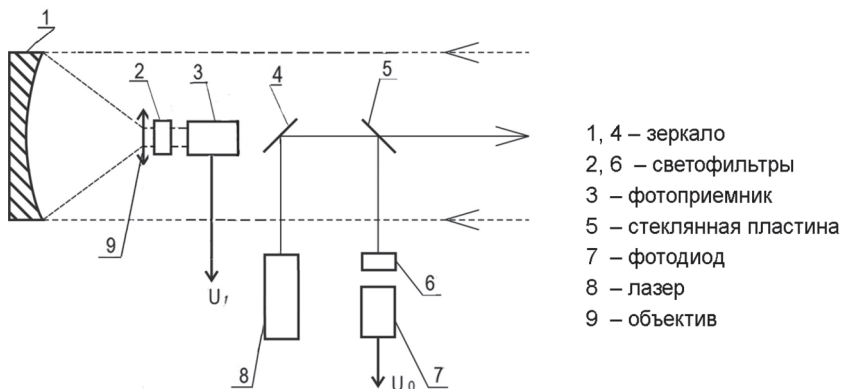


Рис. 1. Лидар КРС
Fig. 1. Raman lidar

кулами собиралось телескопом Ньютона и фокусировалось объективом 9 на фотоприемнике 3, напряжение с которого U_1 записывалось платой сбора данных. Часть излучения направлялась пластиной 5 на фотодиод 7 для контроля энергии импульса.

Лазер лидара будем характеризовать числом фотонов n_0 в импульсе длительностью τ_0 , а линию генерации лазера Гауссовой функцией с максимумом на частоте ν_0 и полушириной Γ_0 . Тогда число фотонов $n(\nu, z)$ излучения КРС молекулами с концентрацией $N(z)$ на фотоприемнике получим из лидарного уравнения в виде интеграла от $(\nu_0 - \Gamma_0)$ до $(\nu_R - \Gamma_R)$ [20]:

$$n(\nu, z) = n_0 c \tau_1 G(z) f t S_0 N(z) \left(d\sigma / d\Omega \right) \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \cdot \Phi(\nu) A(\nu) d\nu / 2z^2 \quad (1)$$

где $n(\nu, z)$ — число зарегистрированных фотонов на частоте ν_R КРС с расстояния z ; n_0 — число фотонов на частоте ν_0 ; S_0 — площадь апертуры телескопа; $G(z)$ — функция лидара в пределах $0 < G(z) < 1$; t — время измерения; $(d\sigma/d\Omega)$ — сечение КРС молекулами водорода.

Пропускание воздушной среды в выражении (1) равно

$$T_0(\nu_0, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_0, r) dr\right] \text{ и } T(\nu_R, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_R, r) dr\right],$$

где $\alpha(\nu_0, r)$ и $\alpha(\nu_R, r)$ — коэффициенты ослабления на частотах излучения и КРС.

Пусть $\Phi(\nu) = 1$ — функция распределения фотонов Гауссова, а аппаратная функция $A(\nu)$ настроена на частоту ν_R полосы КРС с полушириной $\Gamma_a K_1$ — константа на частоте ν_0 , а $\xi(\nu_R)$ — относительная спектральная чувствительность фотоприемника на частоте ν_R излучения КРС.

Тогда уравнение (1) примет следующий вид:

$$n(\nu, z) = \frac{B}{z^2} N(z) t l(\nu, z). \quad (2)$$

В выражении (2) константа B равна

$$B = \frac{c\tau_1}{2} S_0 f, \quad (3)$$

а функция $I(\nu, z)$ будет в виде [13]

$$I(\nu, z) = G(z)n_0(d\sigma / d\Omega) \cdot 0,34K_1\xi(\nu)T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z). \quad (4)$$

Считаем, что сечение КРС постоянно внутри интервала интегрирования по частоте, как и коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и КРС молекулами [16]. Тогда время измерения будет

$$t = \frac{n(\nu, z)z^2}{BI(\nu, z)N(z)}. \quad (5)$$

Рассмотрим однократное КРС и однородную воздушную среду [16, 18].

Результаты и обсуждение

Результаты решения задачи оценки времени измерения концентрации молекул водорода в зависимости от расстояния зондирования лидаром комбинационного рассеяния света с использовани-

ем лидарного уравнения (1) приведены на рис. 2 (расстояние зондирования до 1500 м) и рис. 3 (расстояние зондирования до 100 м).

Использованием 3-й и 2-й гармоник Nd-YAG-лазера с длинами волн 355 и 532 нм, полупроводникового лазера с длиной волны 405 нм и двух газовых лазеров с длинами волн 377 и 510 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 1 мДж при частоте следования импульсов f до 100 кГц решаем задачу мониторинга утечек водорода карьерным самосвалом [19].

Решение уравнения (1) осуществлялось в предположении, что концентрация молекул водорода $N(z) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и за время измерения t будут зарегистрированы 200 фотонов.

Результаты решения уравнения (1), представленные на рис. 2, показывают, что на длине волны излучения 532 нм минимальное время измерения концентрации водорода в воздушной среде предприятий горнодобывающей отрасли можно получить лидаром комбинационного рассеяния света.

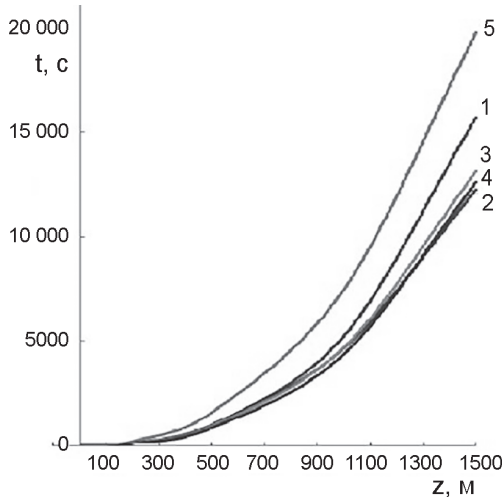


Рис. 2. Время измерения t в функции расстояния z для длин волн 355 (1), 532 (2), 405 (3), 377 (4) и 510 (5) нм (расстояние зондирования до 1500 м)

Fig. 2. Measurement time t as a function of distance z for wavelengths 355 (1), 532 (2), 405 (3), 377 (4) and 510 (5) nm (sensing distance up to 1500 m)

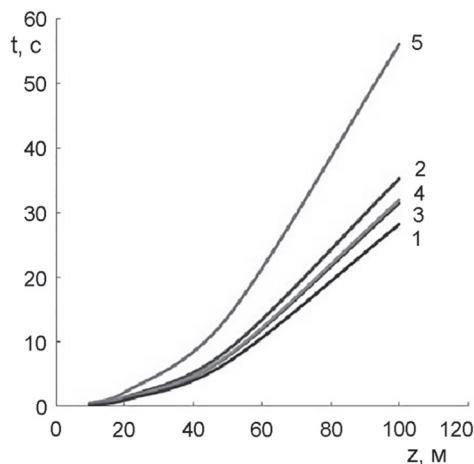


Рис. 3. Время измерения t в функции расстояния z для длин волн 355 (1), 532 (2), 405 (3), 377 (4) и 510 (5) нм (расстояние зондирования до 1500 м)

Fig. 3. Measurement time t as a function of distance z for wavelengths 355 (1), 532 (2), 405 (3), 377 (4) and 510 (5) nm (sensing distance up to 120 m)

При эксплуатации горнодобывающего транспорта, например, карьерных самосвалов БЕЛАЗ серии 75710, и энергетического оборудования — дизельные электростанции АДРя-315 и АДРя-400 при переводе их двигателей на водородное топливо, представляет интерес зондирование молекул водорода в воздухе рабочей зоны на расстояниях до 100 м. Для этого уменьшим расстояние измерения концентраций молекул водорода до 100 м и построим график в виде, представленном на рис. 3, с теми же длинами волн излучения КРС.

Анализ рис. 3 показывает, что лидарное зондирование, например, беспилотным летательным аппаратом с высоты до 100 м, для волны излучения 532 нм дает минимальное время измерения 25 с концентрации молекул водорода 10^{13} см⁻³ в воздушной среде.

Применение водородной технологии на предприятиях горнодобывающей отрасли позволит повысить уровень научно-технического развития как данной отрасли, так и всей страны в целом. Это указано в перечне инициатив социально-экономического развития РФ до 2030 г.,

утвержденных распоряжением Правительства от 6 октября 2021 г. № 2816-р, где в пунктах 27 и 37 раздела V «Технологический рывок» отмечается необходимость развития водородной энергетики и транспорта [20, 21].

Заключение

В ходе исследования была разработана оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света. Для данной схемы были получены результаты решения задачи оценки времени измерения концентрации молекул водорода в зависимости от расстояния зондирования лидаром. Показано, что на длине волны излучения 532 нм получается минимальное время измерения концентрации водорода.

Выполненные расчеты показали, что лидарное зондирование беспилотным летательным аппаратом с высоты до 100 м для волны излучения 532 нм дает минимальное время измерения 25 с концентрации молекул водорода 10^{13} см⁻³ в воздушной среде. Такой режим работы будет оптимальным с точки зрения скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Figueiredo R. L., da Silva J. M., Ortiz C. E. A.* Green hydrogen: Decarbonization in mining – Review // *Cleaner Energy Systems*. 2023, vol. 5, article 100075. DOI: 10.1016/j.cles.2023.100075.
2. *Modina M. A., Khekert E. V., Epikhin A. I.* Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 867, no. 1, article 012072. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012072
3. *Modina M. A., Khekert E. V., Epikhin A. I.* Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 867, no. 1, article 012104. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012104.
4. *Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю.* Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 276–285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.
5. *Куликова А. А.* Новый подход к оценке выбросов от горных предприятий с учетом углеродного следа // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 825–832. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832.
6. *Shahabuddin M., Brooks G., Rhamdhani M. A.* Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: recent development, challenges and technoeconomic analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2023, vol. 395, no. 1, article 136391. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136391.
7. *Ahmad Z., Kaario O., Karimkashi S., Qiang C., Vuorinen V., Larmi M.* Effects of ethane addition on diesel-methane dual-fuel combustion in a heavy-duty engine // *Fuel*. 2021, vol. 289, article 119834. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119834.
8. *Ehrhart B. D., Brooks D. M., Muna A. B., LaFleur C. B.* Risk assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles in tunnels // *Fire Technology*. 2020, vol. 56, pp. 891–912. DOI: 10.1007/s10694-019-00910-z.
9. *Gridina E., Kovshov S., Borovikov D.* Hazard mapping as a fundamental element of osh management systems currently used in the mining sector // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, vol. 1, pp. 107–115. DOI: 10.33271/nvngu/2022-1/107.
10. *Malozymov B. V., Martyushev N. V., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Bukhtoyarov V. V., Wu X., Tyncheko Y. A., Kukartsev V. A.* Overview of methods for enhanced oil recovery from conventional and unconventional reservoirs // *Energies*. 2023, vol. 16, no. 13, article 4907. DOI: 10.3390/en16134907.
11. *Привалов В. Е., Туркин В. А., Шеманин В. Г.* О лазерно-информационных технологиях в водородной энергетике // *Лазеры. Измерения. Информация*. – 2021. – № 1-2. – С. 4–11.
12. *Хазин М. Л., Алакашев Р. А.* Карьерные самосвалы на водородном топливе // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 1. – С. 47–59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_47.
13. *Гридина Е. Б., Боровиков Д. О.* Выявление причин травматизма на основе карт оценки профессиональных рисков на угольном разрезе // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 6-1. – С. 114–128. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_114.
14. *Meyer S. A.* Controlled process for the production of thermal energy from gases and apparatus useful therefore. US Patent No. 4826581, 1989.
15. *Привалов В. Е.* Устройство для разложения воды / *Лазерные информационные технологии*. Труды XXVI Международной конференции. – Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2018. – С. 40–41.
16. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
17. *Gibson A. J., Sanford M. C. W.* Daytime measurement of the atmospheric sodium layer // *Nature*. 1972, vol. 239-2, pp. 509–511.
18. *Privalov V. E., Shemanin V. G.* Hydrogen and iodine molecules lidar monitoring in atmosphere // *Proceedings of SPIE*. 2000, vol. 4064, pp. 2–11.
19. *Voronina E. I., Privalov V. E., Shemanin V. G.* The iodine molecules in the near-earth atmospheric layer fluorescence lidar sensing from space orbit // *Optical Memory and Neural Networks*. 2009, vol. 18-3, pp. 212–217.
20. *Rovnik N. A., Lushpeev V. A., Tananykhin D. S., Shpurov I. V.* Rational gas inflow restriction technologies during the development of oil rims // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. 2019, vol. 2020, pp. 888–900. DOI: 10.1201/9781003014638-54.

21. Гридина Е. Б., Боровиков Д. О. Повышение безопасности труда рабочего персонала карьера, расположенного в сложных горно-геологических условиях Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9-1. — С. 149–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_149.

22. IEA. The future of hydrogen. International Energy Agency. Paris, 2019. **MIAB**

REFERENCES

1. Figueiredo R. L., da Silva J. M., Ortiz C. E. A. Green hydrogen: Decarbonization in mining — Review. *Cleaner Energy Systems*. 2023, vol. 5, article 100075. DOI: 10.1016/j.cles.2023.100075.

2. Modina M. A., Kheker E. V., Epikhin A. I. Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 867, no. 1, article 012072. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012072

3. Modina M. A., Kheker E. V., Epikhin A. I. Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 867, no. 1, article 012104. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012104.

4. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Hierarchical structure of aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 276–285. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

5. Kulikova A. A. A new approach to estimating emissions from mining enterprises, taking into account the carbon footprint. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 4, pp. 825–832. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-825-832.

6. Shahabuddin M., Brooks G., Rhamdhani M. A. Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: recent development, challenges and technoeconomic analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2023, vol. 395, no. 1, article 136391. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136391.

7. Ahmad Z., Kaario O., Karimkashi S., Qiang C., Vuorinen V., Larmi M. Effects of ethane addition on diesel-methane dual-fuel combustion in a heavy-duty engine. *Fuel*. 2021, vol. 289, article 119834. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119834.

8. Ehrhart B. D., Brooks D. M., Muna A. B., LaFleur C. B. Risk assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles in tunnels. *Fire Technology*. 2020, vol. 56, pp. 891–912. DOI: 10.1007/s10694-019-00910-z.

9. Gridina E., Kovshov S., Borovikov D. Hazard mapping as a fundamental element of osh management systems currently used in the mining sector. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, vol. 1, pp. 107–115. DOI: 10.33271/nvngu/2022-1/107.

10. Malozyomov B. V., Martyshev N. V., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Bukhtoyarov V. V., Wu X., Tyncheko Y. A., Kukartsev V. A. Overview of methods for enhanced oil recovery from conventional and unconventional reservoirs. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 13, article 4907. DOI: 10.3390/en16134907.

11. Privalov V. E., Turkin V. A., Shemanin V. G. About laser-information technologies in hydrogen energy. *Lasers. Measurements. Information*. 2021, no. 1-2, pp. 4–11. [In Russ].

12. Khazin M. L., Apakashev R. A. Hydrogen-powered mining trucks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 47–59. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_47.

13. Gridina E. B., Borovikov D. O. Identification of the causes of injuries based on occupational risk assessment maps at the open-pit coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 114–128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_114.

14. Meyer S. A. Controlled process for the production of thermal energy from gases and apparatus useful therefore. *US Patent No. 4826581*, 1989.

15. Privalov V. E. Water decomposition device. *Lazernye informatsionnye tekhnologii. Trudy XXVI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proceedings of the XXVI Conference Laser Information Technologies], Novorossiysk, 2018, no. 40–41. [In Russ].

16. Mezheris R. *Lazernoe distantsionnoe zondirovanie* [Laser remote sensing], Moscow, Mir, 1987, 550 p.

17. Gibson A. J., Sanford M. C. W. Daytime measurement of the atmospheric sodium layer. *Nature*. 1972, vol. 239-2, pp. 509–511.

18. Privalov V. E., Shemanin V. G. Hydrogen and iodine molecules lidar monitoring in atmosphere. *Proceedings of SPIE*. 2000, vol. 4064, pp. 2–11.

19. Voronina E. I., Privalov V. E., Shemanin V. G. The iodine molecules in the near-earth atmospheric layer fluorescence lidar sensing from space orbit. *Optical Memory and Neural Networks*. 2009, vol. 18-3, pp. 212 – 217.

20. Rovnik N. A., Lushpeev V. A., Tananykhin D. S., Shpurov I. V. Rational gas inflow restriction technologies during the development of oil rims. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. 2019, vol. 2020, pp. 888 – 900. DOI: 10.1201/9781003014638-54.

21. Gridina E. B., Borovikov D. O. Improving the safety of the working personnel of a quarry located in difficult mining and geological conditions of the Far North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 149 – 163. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_149.

22. IEA. *The future of hydrogen*. International Energy Agency. Paris, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Привалов Вадим Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

e-mail: vaevpriv@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2904-7382,

Туркин Владимир Антонович — д-р техн. наук,

профессор, Государственный морской университет

имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,

e-mail: turvla@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2945-6143,

Шеманин Валерий Геннадьевич — д-р физ.-мат. наук,

профессор, Новороссийский политехнический институт

(филиал) Кубанского государственного технологического

университета, e-mail: vshemanin@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0707-489X.

Для контактов: Туркин В.А., e-mail: turvla@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.E. Privalov, Dr. Sci. (Phys. Mathem.),

Professor, Peter the Great St. Petersburg

Polytechnic University, 195251, Saint-Petersburg,

Russia, e-mail: vaevpriv@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2904-7382,

V.A. Turkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Admiral Ushakov Maritime State University,

353924, Novorossiysk, Russia,

e-mail: turvla@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2945-6143,

V.G. Shemanin, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Professor,

Novorossiysk Polytechnic Institute (branch)

of Kuban State Technological University,

353900, Novorossiysk, Russia,

e-mail: vshemanin@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0707-489X.

Corresponding author: V.A. Turkin, e-mail: turvla@mail.ru.

Получена редакцией 01.03.2024; получена после рецензии 06.05.2024; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 01.03.2024; received after the review 06.05.2024; accepted for printing 10.06.2024.